

辽西北风沙土滴灌追氮次数对玉米生长和产量的影响

窦超银, 刘富强

(扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:【目的】合理确定风沙土地区玉米滴灌氮肥追施次数。【方法】采用田间试验的方法, 将生育期的追施氮肥以水肥一体化的形式分次追施, 研究不同追氮次数, 1次(F1)、2次(F2)、4次(F3)、7次(F4)和11次(F5)5种追氮次数对玉米生长和产量的影响。【结果】拔节期集中追施或抽穗期前分多次追施有利于玉米株高、茎粗和叶片生长, 获得较大的LAI和叶片SPAD值。分多次追肥玉米考种指标, 如穗长、穗粗、行粒数、百粒质量等均优于集中施肥, 从而有利于产量形成。产量不仅与追氮次数有关, 还与氮肥在各生育阶段的配比有关, 当抽穗期及灌浆期追肥比例相对较小时, 尽管全生育期追氮次数较多, 但行粒数和百粒质量等指标偏小, 导致产量和肥效偏低; 在满足关键期需肥时, 追肥分次越多, 越有利于产量形成, 生育期内追肥11次获得最高产量、IWUE、WUE和氮效率分别为7.36 t/hm²、3.27 kg/m³、1.25 kg/m³和24.52 kg/kg。【结论】少量多次的追肥方式是促进玉米植株生长和提高产量的有效途径, 在辽西北风沙土地区玉米滴灌追氮次数以11次为宜。

关键词: 氮肥; 滴灌; 风沙土; 水肥一体化; 水分利用效率

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023002

OSID:



窦超银, 刘富强. 辽西北风沙土滴灌追氮次数对玉米生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 67-73.

DOU Chaoyin, LIU Fuqiang. Effects of Topdressing Frequency on Growth and Yield of Maize in Aeolian Sandy Soil under Fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 67-73.

0 引言

【研究意义】滴灌是近年来发展较快的节水灌溉技术之一, 除管网化输水和局部灌溉提高了灌溉水分利用系数外, 其对土壤水肥气热条件的调控能力也备受关注。滴灌一方面可为作物生长营造良好的土壤环境, 尤其是结合水肥一体化技术, 明显提升作物品质^[1]和水分利用效率^[2]; 另一方面, 可弥补劣质土壤资源的不足, 改善土壤条件, 提高土壤生产力, 如保持湿润区高水势持续淋洗盐分使盐碱地得以快速利用等^[3]。滴灌的这一特点为保水保肥性差的风沙土壤资源的利用提供了理论基础。风沙土玉米滴灌采用少量多次的灌溉制度, 可将灌溉水控制在根系分布层内^[4-5], 有利于作物植株生长和增加产量^[6-7]。但与常规土壤相比, 产量仍然偏低。这是由于现有研究集中于风沙土滴灌水分运动规律和灌溉制度, 主要解决如何科学灌溉的问题^[4-8], 并没有从根本上解决风沙土壤养分低, 且保肥性差的问题。

【研究进展】一般来说, 增加施肥量是提高土壤养分最直接的途径。前人^[9]研究表明, 风沙土玉米施氮量从225 kg/hm²提高到300 kg/hm²时, 产量可增加

18.6%, 尽管增产效应明显, 但仍低于常规土壤, 且随着灌水量的增加, 增产效果下降, 这说明单靠增加施肥量不能充分发挥土地效益, 还必须结合土壤水分状况对施肥制度进行优化。施肥次数是施肥制度的重要参数之一, 考虑作物需肥特性, 少量多次施肥可促进作物对养分的吸收和植株营养生长^[10], 有利于作物生理活动^[11], 提高作物的产量和氮素利用效率^[12-13]。从土壤养分角度来看, 若系统管理不当, 即使是滴灌条件下仍具有养分淋失的风险^[14], 如集中施肥后, 多次灌溉会导致水分和养分向根区以下转移, 少量多次施肥可减少养分的地表径流和地下淋洗损失^[15], 分施次数越多, 土壤全氮、NO₃⁻-N量等越高, 且土壤N₂O累积排放量比一次性施肥的土壤明显减少^[16]。因此, 增加施肥次数可改变养分在土壤中的迁移转化过程, 提高养分利用效率, 是作物增产的有效措施。【切入点】目前, 风沙土滴灌仍多采用集中施肥的方式, 由于风沙土保水保肥性差, 养分很容易被降雨淋洗, 将集中施肥分为多次追施是减少氮肥淋失的有效途径。因此, 利用滴灌调控施肥次数以减少风沙土养分淋失, 确定施肥次数是首要解决的关键问题。【拟解决的关键问题】因此, 本研究将集中施肥改为少量多次施肥方式, 分析追氮次数对玉米生长和产量的影响, 确定适宜追氮次数, 为风沙土壤滴灌技术的合理利用提供理论依据。

收稿日期: 2023-01-02 修回日期: 2023-06-18 网络出版日期: 2023-11-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51609208)

作者简介: 窦超银(1982-), 男, 江苏如皋人。高级工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术、农业水土资源高效利用研究。E-mail: chydou@163.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于辽宁省彰武县北甸子村 (E122°23', N42°50'), 地处科尔沁沙地南缘, 属于温带半干旱季风气候区, 其主要特征是干燥、风沙大。多年平均降水量 412 mm, 降水量年内分布不均, 夏季降水量占全年降水量的 60%~70%; 多年平均蒸发量 1 781 mm; 年平均气温 6.1 °C, 平均风速 3.7~4.2 m/s, 最大瞬时风速达 24.0 m/s, 沙尘暴天气 10~15 d; 植物生长期 145~150 d, 无霜期 154 d。试验区土壤主要为风沙土, 干体积质量 1.69 g/cm³, 田间持水率 12%, 饱和含水率为 16.9%。土壤颗粒粒径主要分布在 0.075~2 mm, 其中 0.5~2 mm 粒径颗粒占 0.2%, 0.25~0.5 mm 粒径颗粒占 28.3%, 0.075~0.25 mm 粒径颗粒占 69.7%, <0.075 mm 粒径颗粒占 1.8%。有机质量为 0.66 g/kg, 碱解氮量为 7.2 mg/kg, 速效磷量为 1.7 mg/kg, 速效钾量为 19.1 mg/kg, 全氮量为 0.026 g/kg。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 5—10 月进行, 玉米供试品种为“辽单 535”, 氮肥为尿素 (含氮量 6.4%)。根据玉米生长阶段划分为苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、完熟期 5 个生育期, 灌水量利用计算式为:

表 1 各处理追施氮肥日期

Table 1 Application date of different nitrogen fertilizer treatments

处理	追氮次数/次	追氮日期										
		苗期		拔节期		抽穗期		灌浆期				
F1	1			0619								
F2	2			0619					0805			
F3	4	0601		0619			0722		0805			
F4	7	0601		0612	0619	0630	0722	0728	0805			
F5	11	0601	0607	0612	0619	0625	0630	0712	0722	0728	0805	0821

玉米采用大垄双行种植, 垄距 1.2 m, 宽行距 0.8 m, 窄行距 0.4 m, 株距 0.3 m。单个小区内 5 垄, 垄长 5 m, 小区面积 30 m²。小区采用重力滴灌, 灌溉前计算灌水量, 注入桶中; 追氮肥前将各小区追氮肥所需尿素溶解, 溶液倒入桶中, 注水拌匀, 以水肥一体化形式灌溉施肥。

1.3 田间管理

播种前种子进行晾晒处理, 各处理均在春播前翻地, 平整土地, 施农家肥 (鸡粪) 1.5 t/hm², 5 月上旬起垄铺设滴灌带, 覆膜播种。5~6 叶期定苗, 拔节期中耕除草, 喷施农药甲胺磷 1 次, 防治虫害。8 月 24 日后玉米进入完熟期, 由于多次降水, 停止灌溉, 9 月 27 日收获。

1.4 测定指标和方法

利用试验站小型气象站监测降水量, 在试验区玉

$W=\alpha K_{ci}(E_{k,5}-P_{k,5})$ 。式中: $E_{k,5}$ 为第 k 个 5 日水面累计蒸发量, 逐日实测; $P_{k,5}$ 为第 k 个 5 日累计降水量, 逐日实测; K_{ci} 为第 i 个生育期作物系数; α 为需水系数, 根据前期试验结果取 0.8^[8]。试验期间共灌水 13 次, 累计灌溉水量为 172.4 mm。

纯氮施氮量采用推荐用量 300 kg/hm²^[9], 氮肥施肥比例为基肥: 追肥=7:3, 基肥在使用起垄-播种-施肥-覆土-覆膜一体机春播时施入。以氮肥追施次数为试验因素, 根据前期灌溉试验灌水次数 11 次为依据, 将追氮量分次追施, 施肥次数分别为 1、2、4、7、11 次, 单次施氮量等于追氮量与施肥次数的比值。在试验设计时, 由于灌溉制度与气象条件有关, 追肥时间在试验前并未确定, 但优先考虑关键期施氮肥, 如拔节肥、穗肥和灌浆期施肥, 1 次追肥处理为拔节肥, 2 次追肥处理为拔节肥和灌浆肥, 4 次追肥处理为苗肥、拔节肥、穗肥和灌浆肥, 其他处理根据灌水时间调整。试验结束后根据试验记录, 追肥时间见表 1。其中 5 月 15 日—6 月 10 日、6 月 11 日—7 月 5 日、7 月 6 日—7 月 31 日、8 月 1 日—8 月 25 日分别为苗期、拔节期、抽穗期和灌浆期, 试验共设 5 个处理, 每个处理 3 个重复, 共 15 个小区, 小区随机布置。

米植株上方放置 20 cm 蒸发皿测量蒸发量, 每天 08:00 测量。灌水量通过水表观测。每个生育期各处理选 9 株测量玉米株高、茎粗、单株全部展开叶的叶面积和叶绿素量 (SPAD 值), 叶面积指数 (LAI) 用叶面积和单位土地面积折算求得, SPAD 值用 SPAD-502 叶绿素测定仪。收获时在各小区随机取样 3 株考种 (穗长、穗粗、穗行数、行粒数、穗粒数和百粒质量等), 并计算产量。植株干质量采用地上植株放入烘箱在 105 °C 杀青 0.5 h, 75 °C 下烘至恒质量, 采用电子天平称量。

1.5 数据处理与分析

灌溉水利用效率 (kg/m³): 产量 (kg/hm²) 与灌水量 (m³/hm²) 的比值; 水分利用效率 (kg/m³): 产量 (kg/hm²) 与耗水量 (m³/hm²) 的比值, 其中耗水量为灌水量与有效降水量之和; 氮效率 (kg/kg): 产量 (kg/hm²) 与施氮量 (kg/hm²) 的比值。

常规数据整理由 Excel 2020 完成，单因素方差分析 (ANOVA) 和相关分析由 SPSS 24.0 完成。

2 结果与分析

2.1 滴灌追氮次数对玉米生长的影响

2.1.1 株高

玉米生长期内株高变化如图 1 所示，图中同一生育期各处理上标注的不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。各处理玉米株高均随生育期推进先增大后减小，抽穗期前增长较快，拔节期和抽穗期株高平均增加 257.5% 和 95.0%；抽穗期后增加较小，抽穗期到灌浆期平均增加 10.5%；株高在灌浆期达到最大，完熟期降低 2.2%。各处理苗期株高差异较小；拔节—抽穗期株高表现为 F5 处理 > F1 处理 > F4 处理 > F2 处理 > F3 处理，其中 F5、F1 处理与 F4 处理株高接近，差异小于 10 cm，F2 处理和 F3 处理株高差小于 5 cm，但均低于 F5、F1、F4 处理 15~30 cm，即随着追氮次数的增加玉米株高先减小后增大；灌浆期、完熟期 F1 处理株高最高，分别为 249.5、245.2 cm，F2—F5 处理株高相近，灌浆期、完熟期株高均值分别为 242.8、237.1 cm；除拔节期 F5 处理株高显著高于 F2、F3 处理，抽穗期 F5 处理株高显著高于 F2 处理外 ($p < 0.05$)，苗期、灌浆期、完熟期各处理株高差异均不显著。

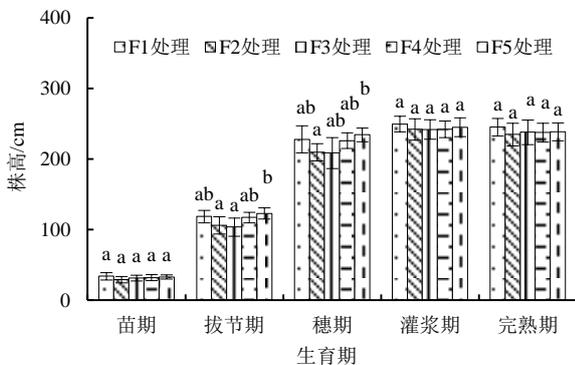


图 1 玉米生育期内株高变化

Fig.1 Changes in plant height during maize growth period

2.1.2 茎粗

玉米生长期内茎粗变化如图 2 所示。茎粗随玉米生育期推进先增大后减小，苗期—拔节期茎粗均值从 9.3 mm 增加到 26.7 mm，增加 187.5%；拔节—抽穗期茎粗仅增加 0.3 mm，增加 1.1%，即灌浆前茎粗已基本成型；抽穗期后，茎粗均值从 27.0 mm 逐渐减小到完熟期 25.3 mm，减少 6.4%。苗期各处理茎粗介于 7~10 mm，随追氮次数增加无明显变化规律；拔节期集中施肥 F1 处理茎粗 26.6 mm，介于 F3、F4 处理之间，F2 处理茎粗最小，即除集中追肥处理外，茎粗随追氮次数的增加而增大；拔节期—抽穗期，F2 处

理茎粗持续增大，其他处理茎粗增长较小，抽穗期处理之间差异小于 2 mm；抽穗期后，F1—F3 处理茎粗减小 2.5~3 mm，而 F4、F5 处理分别减小 0.4、1.5 mm；完熟期 F4、F5 处理茎粗大于其他处理。拔节期 F5 处理茎粗显著高于 F2 处理，苗期、穗期、灌浆期和完熟期各处理之间茎粗差异均不显著。

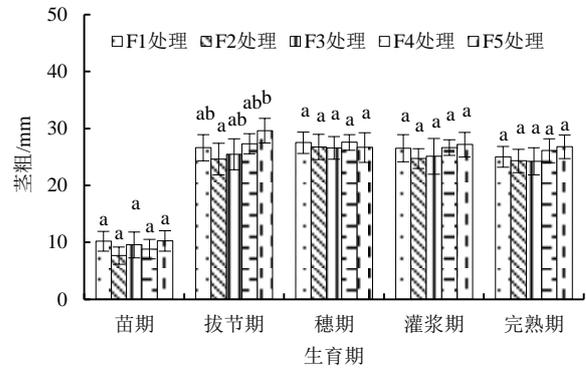


图 2 玉米生育期内茎粗变化

Fig.2 Changes in stem diameter during maize growth period

2.1.3 叶面积指数 (LAI)

玉米生长期内 LAI 变化如图 3 所示，LAI 随玉米生长先增大后减小，苗期—拔节期和拔节—抽穗期 LAI 分别平均增加 1.42 和 1.50，抽穗—灌浆期 LAI 仅增长了 2.9%，灌浆—完熟期 LAI 平均减少 15.3%，减小到 2.72，即随着生育期推进，叶片持续快速增长到抽穗期接近峰值，灌浆期后叶片面积明显减少。各处理苗期 LAI 值介于 0.18~0.26；拔节期 F2—F5 处理 LAI 表现为随追氮次数增加而增大，其中 F5 处理最大达到 1.87，较最小的 F2 处理高 32.8%，F1 处理 LAI 值为 1.76，介于 F4 处理与 F5 处理之间；拔节—完熟期，LAI 始终随着追氮次数的增加先减小后增大，均表现为：F5 处理 > F1 处理 > F4 处理 > F3 处理 > F2 处理，LAI 最大的 F5 处理较 F2 处理高 17.6%；与灌浆期 LAI 值相比，各处理灌浆—完熟期 LAI 降幅相近，均在 14%~17%。苗期—完熟期各处理 LAI 差异均不显著。

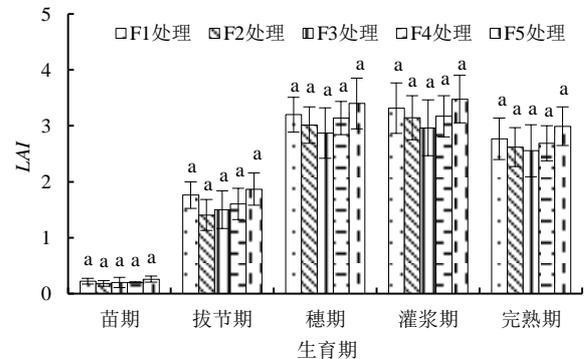


图 3 玉米生育期内 LAI 值变化

Fig.3 Changes in LAI values during maize growth period

2.1.4 叶片叶绿素量 (SPAD 值)

玉米生长期内 SPAD 值变化如图 4 所示。SPAD 值随着作物生长呈先增大后减小的变化趋势，灌浆期

SPAD 值达到最大, 苗期—灌浆期 SPAD 均值从 50.7 增大到 64.6, 增加了 29%; 完熟期 SPAD 均值下降到 63.6, 降幅 1.6%, 与 LAI 等生长指标相比, SPAD 值在生长期中变幅较小, 前期缓慢增加, 后期少量下降。苗期和拔节期随追氮次数的增加各处理 SPAD 值无明显变化规律; 抽穗期随追氮次数的增加, SPAD 值先减小后增大, 其中 F3 处理最小, SPAD 值为 59.0, 较最大的 F5 处理低 9.4%; 抽穗期后, F5 处理 SPAD 值逐渐减小, 完熟期下降到 62.2, 其他处理 SPAD 值仍随追氮次数增多先减小后增大, F3 处理仍最小, 此阶段 F1 处理 SPAD 值最大, 较 F3 处理高 9.2%。苗期—完熟期各处理间 SPAD 值差异均不显著。

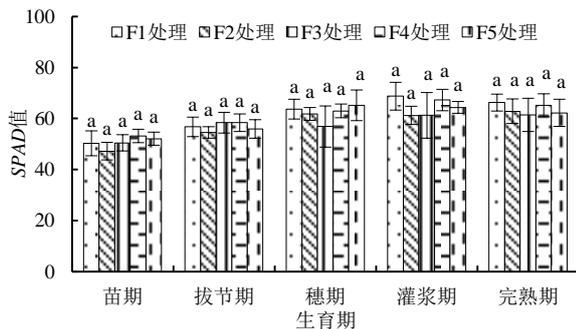


图 4 玉米生育期内 SPAD 值变化

Fig.4 Changes in SPAD value during maize growth period

2.2 滴灌追氮次数对玉米产量构成要素影响

玉米产量构成要素见表 2。穗质量、穗粗随追氮次数增加而增大, F1 处理穗质量 321.5 g, 较 F5 处理

降低 18.2%, 且二者差异显著; F2、F3、F4 处理穗质量相近, 较 F5 处理小 11.6%~12.8%, F2、F3、F4 处理之间差异不显著; 穗粗从 F1 处理的 50 mm 增加到 F5 处理的 53.2 mm, 各处理之间差异不显著。各处理玉米穗长介于 20.3~22.1 cm, 其中 F1 处理最小, F5 处理最大, 且二者差异显著, 但二者与其他处理之间差异均不显著。穗行数一般为 16 行或 18 行, 少量样本 14 行, 各处理均值差异较小, 且均未达到显著水平。F1 处理行粒数最少, 均值为 38.8 粒, F5 处理行粒数最多, 均值为 42.3 粒, 且二者差异显著, 但二者与其他处理之间差异均不显著, F2、F3、F4 处理行粒数相近, 均值介于 40.2~41.7, 随着追氮次数增加有减小趋势。追氮次数对秃尖长的影响与行粒数相似, F1、F4 处理秃尖长较小, F2、F3、F5 处理秃尖长接近, 秃尖长约为 F1、F4 处理的 2 倍, 且 F2、F3、F5 处理与 F1、F4 处理差异显著。穗粒数随追氮次数的增加而增大, F1 处理穗粒数为 270.4 粒, F5 处理 327.0 粒, 较 F1 处理多 21.0%, 且二者差异显著; F2、F3、F4 处理穗粒数相近, 介于 385.8~291.7 g, 较 F5 处理小 12.6%~10.8%, F2、F3、F4 处理之间差异不显著。各处理百粒质量介于 43.1~46.4 g, 且差异均不显著; 集中追肥的 F1 处理百粒质量最小, F2 处理百粒质量最大, 随着追氮次数的增加, 百粒质量减小, 但追氮次数最多的 F5 处理百粒质量为 44.9 g, 仅次于 F2 处理。

表 2 不同处理对玉米考种指标影响

Table 2 Effects of different treatments on corn seed testing indicators

处理	穗质量/g	穗长/cm	穗粗/mm	穗行数/行	行粒数/粒	秃尖长/cm	穗粒数/粒	百粒质量/g
F1	321.5±29.0a	20.3±1.5b	50.0±1.5a	16.0±1.2a	38.8±2.4b	0.9±0.3b	270.4±24.3b	43.1±3.1a
F2	343.1±18.5a	21.0±1.0ab	50.1±1.3a	15.7±0.9a	41.7±0.7a	1.6±0.3a	285.8±16.2b	46.4±2.2a
F3	342.9±28.1a	21.8±1.9ab	50.8±0.9a	16.0±0.5a	41.5±1.6a	1.5±0.3a	289.2±24.7b	44.5±2.1a
F4	347.5±17.7a	20.7±1.4ab	51.2±0.9a	17.3±1.6a	40.2±1.1ab	0.7±0.2b	291.7±15.4b	43.7±2.2a
F5	393.1±11.9b	22.1±1.0a	53.2±0.6a	17.3±1.2a	42.3±0.8a	1.8±0.6a	327.0±10.7a	44.9±1.5a

2.3 滴灌追氮次数对玉米产量及水氮利用效率影响

各处理玉米产量及水氮利用效率见表 3。F5 处理产量为 7.36 t/hm², 显著高于其他处理; F1、F2、F3、F4 处理玉米产量差异不显著, 其中 F1 处理产量最低为 5.79 t/hm², F2—F4 处理产量随着追氮次数的增加而减小, 其中 F4 处理较 F2 处理产量仅减少 2.4%。灌溉水利用效率 (IWUE)、水分利用效率 (WUE) 和氮效率均表现为 F5 处理>F2 处理>F3 处理>F4 处理>F1 处理, 其中, F5 处理 IWUE、WUE 和氮效率分别达到 3.27 kg/m³、1.25 kg/m³ 和 24.52 kg/kg, 较 F2 处理高 0.38 kg/m³、0.15 kg/m³ 和 2.85 kg/kg, 较最低的 F1 处理高 0.70 kg/m³、0.27 kg/m³ 和 5.23 kg/kg; F5 处理水氮利用效率显著高于其他处理, 而其他处

理之间差异均不显著。

表 3 不同处理对玉米产量和水氮利用效率的影响

Table 3 Effects of different treatments on corn yield and water and nitrogen efficiency

处理	产量/(t hm ⁻²)	灌溉水利用效率/(kg m ⁻³)	水分利用效率/(kg m ⁻³)	氮效率/(kg kg ⁻¹)
F1	5.79±0.8b	2.57±0.3b	0.98±0.1b	19.29±2.6b
F2	6.50±0.7b	2.89±0.3b	1.10±0.1b	21.67±2.2b
F3	6.37±0.9b	2.83±0.4b	1.08±0.2b	21.25±3.0b
F4	6.35±0.7b	2.82±0.3b	1.08±0.1b	21.15±2.2b
F5	7.36±0.5a	3.27±0.2a	1.25±0.1a	24.52±1.5a

3 讨论

充足的底肥加上少量多次的高频施肥有利于提高肥料利用率, 既能促进作物前期的早生快发, 中期

的稳生稳长，又能保证后期不脱肥^[17]，源源不断地供给作物生长期间所需养分，满足作物不同生育期对养分的要求。本试验中追肥总量不变，追氮次数越多单次追肥量越少。拔节期施肥对玉米株高有影响，F1、F5 处理玉米株高均较高，这是因为苗期—拔节期玉米处于营养生长旺盛阶段，需要较多的养分供给，一次性施入肥料和高频少量分施均能满足玉米植株形态建成的需求，但一次性施入肥料会刺激生育前期氮代谢，造成根系和土壤微生物产生激烈的元素竞争，再加上生育期内雨水的淋洗，增大了生育后期玉米氮素供需矛盾^[18]，导致产量及产量因子、氮肥利用效率低；分次施肥则控制了苗期植株的过快生长，促进根系的正常发育，有利于土壤微生物繁殖，加之高频少量施肥受雨水淋洗的影响较小，更有利于兼顾全生育期内的生长，提高氮肥利用率。拔节期施肥玉米基部茎节干物质积累较高，茎粗明显变大^[19]，随着施肥次数的增多，茎粗逐渐增加^[20]。本试验也表现出相同结果，说明拔节期集中追肥和拔节期少量多次追肥均有利于茎秆生长。本研究表明，F1 处理拔节期集中追肥和 F5 处理抽穗期前多次追肥均能增大玉米叶面积和叶绿素量，这是因为增加追肥的比例和少量多次的施肥能为玉米生长关键期提供充足的养分，玉米叶绿素降解延缓^[21]，同时抽穗期追肥提高了叶片活力，延缓了叶片输出氮，促进后期物质合成与积累^[22]。

将氮肥结合灌溉以少量多次的方式施入时，既能提高有效性，减少淋失，又能兼顾每个生育期作物的需求，在获得最优生长性状和产量的同时，提高作物水分利用效率和氮肥利用率，但追氮次数并不是越多越好，董作珍等^[23]研究发现，施肥次数由 11 次降至 9 次时，藎草产量、品质和氮肥偏生产力均有一定提升，本试验也表现出相似效果，追肥 4 次处理较追肥 7 次处理效果好，因为 4 次追肥均在生育关键期追施，尽管追氮次数少，但是集中有效，在作物最需要肥的时候，效果最为明显；盲目的增加施肥次数，减小了需肥关键期的追肥量，效果反而不如次数少的追肥处理。因此在生产上应该根据玉米生育关键期制定施肥次数，既能提高前期玉米生长发育，又能通过氮肥后移减缓叶片衰老，实现丰产稳产，并且减少了氮肥的淋溶损失，提高氮肥利用率^[24]。

4 结论

1) 追肥集中在生育前期有利于植株营养生长，获得较高的株高、茎粗、LAI、SPAD 值。追肥量兼顾拔节肥、穗肥时，前期株高生长相对缓慢，茎粗较小，LAI 和 SPAD 值较小，但后期长势可弥补前期不足。

2) 追肥集中在生育前期不利于产量形成；提高

抽穗期追肥量对产量构成指标的提高有促进作用。

3) 追肥集中在生育前期不利于获得高产和提高水氮利用效率，少量多次追肥方案产量最高；玉米关键期追肥产量和水氮利用效率虽有减少，但施肥次数少，具有省工优势。

因此，在风沙土地区应用滴灌水肥一体化技术时，宜将追肥与灌溉结合，以少量多次追肥方式追施，追氮次数推荐为 11 次。在难以实现少量多次追施时，可结合需肥规律，在玉米生长关键期随水追施，但应避免集中 1 次追肥。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献：

- [1] MÖLLER M, WEATHERHEAD E K. Evaluating drip irrigation in commercial tea production in Tanzania[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2007, 21(1): 17-34.
- [2] 庞永磊, 王凤新, 黄泽军, 等. 适宜施氮钾水平提高滴灌秋茶的产量及品质[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 98-103.
PANG Yonglei, WANG Fengxin, HUANG Zejun, et al. Improving yield and quality of autumn tea with drip irrigation under appropriate nitrogen and potassium fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 98-103.
- [3] 李晓彬, 康跃虎. 滨海重度盐碱地微咸水滴灌水盐调控及月季根系生长响应研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 112-121.
LI Xiaobin, KANG Yuehu. Water-salt control and response of Chinese rose(Rosa chinensis) root on coastal saline soil using drip irrigation with brackish water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 112-121.
- [4] 窦超银, 孟维忠, 佟威, 等. 风沙土玉米地下滴灌技术田间应用试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 46-50.
DOU Chaoyin, MENG Weizhong, TONG Wei, et al. Application of subsurface drip irrigation to maize field in aeolian sandy soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 46-50.
- [5] 唐士劫, 窦超银. 滴头流量对风沙土滴灌湿润锋转移影响的试验研究[J]. 节水灌溉, 2018(11): 56-60, 72.
TANG Shijie, DOU Chaoyin. An experiment study of the effects of dripper discharge on soil wetting front under drip irrigation in aeolian sandy soil[J]. Water Saving Irrigation, 2018(11): 56-60, 72.
- [6] 李玉义, 逢焕成, 陈阜, 等. 膜下滴灌对风沙土盐分变化和棉花产量的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 96-100.
LI Yuyi, PANG Huancheng, CHEN Fu, et al. Effect of drip irrigation under plastic mulch on aeolian sandy soil salt dynamic and cotton yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 96-100.
- [7] 窦超银, 孟维忠, 佟威, 等. 风沙土玉米膜下滴灌适宜灌溉频率试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(2): 13-17, 49.
DOU Chaoyin, MENG Weizhong, TONG Wei, et al. Experiment study on irrigation frequency of maize under mulch-drip irrigation in aeolian sandy soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(2): 13-17, 49.
- [8] 王鼎新, 窦超银, 孟维忠, 等. 风沙土玉米膜下滴灌灌溉制度试验研究[J]. 节水灌溉, 2019(8): 34-38.
WANG Dingxin, DOU Chaoyin, MENG Weizhong, et al. Experimental research on mulch-drip irrigation regime for maize in aeolian sandy soil[J]. Water Saving Irrigation, 2019(8): 34-38.

- [9] 窦超银, 王鼎新, 孟维忠, 等. 风沙土玉米滴灌氮肥适宜用量试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 16-21.
DOU Chaoyin, WANG Dingxin, MENG Weizhong, et al. Experimental study of the suitable N-fertilizer amount for corn under drip irrigation in aeolian sandy soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(11): 16-21.
- [10] 殷星, 禄涛, 曾庆涛, 等. 氮肥滴施次数及比例对机采棉产量和氮肥利用率的影响[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(11): 1 971-1 978.
YIN Xing, LU Tao, ZENG Qingtao, et al. Effects of nitrogen fertigation frequency and proportion on yield and nitrogen use efficiency of machine-picked cotton[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(11): 1 971-1 978.
- [11] 周艳, 李明思, 蓝明菊, 等. 施肥频率对滴灌春小麦生长和产量的影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(4): 72-75.
ZHOU Yan, LI Mingsi, LAN Mingju, et al. Effect of the frequency of fertilizer application on the grain yield and growth of spring wheat under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(4): 72-75.
- [12] 王平, 田长彦, 陈新平, 等. 南疆棉花施氮量及氮素平衡分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 77-83.
WANG Ping, TIAN Changyan, CHEN Xinping, et al. Investigation of N fertilization practice and N equilibrium analysis in cotton fields in South Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(1): 77-83.
- [13] 栗岩峰, 李久生, 李蓓. 滴灌系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素动态的影响[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 857-865.
LI Yanfeng, LI Jiusheng, LI Bei. Nitrogen dynamics in soil as affected by fertigation strategies and frequencies for drip-irrigated tomato[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 857-865.
- [14] WANG F X, KANG Y H, LIU S P. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 79(3): 248-264.
- [15] 邓兰生, 陈卓森, 郭彦彪, 等. 滴灌施肥次数对甜玉米生长及养分淋洗损失的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2 142-2 147.
DENG Lansheng, CHEN Zhuosen, GUO Yanbiao, et al. Effects of different fertigation times on growth of sweet maize and nutrient leaching loss[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(5): 2 142-2 147.
- [16] 方雅各, 解钰, 王丽华, 等. 等氮量下不同分施次数对燥红壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 347-352.
FANG Yage, XIE Yu, WANG Lihua, et al. Effects of different nitrogen application times on N₂O emission in dry red soil[J]. Soils, 2018, 50(2): 347-352.
- [17] 郭润泽, 秦文洁, 邹晓霞, 等. 膜下滴灌追肥时期和次数对花生光合特性和产量的影响[J]. 花生学报, 2020, 49(3): 32-39.
GUO Runze, QIN Wenjie, ZOU Xiaoxia, et al. Effect of topdressing stage and times on the photosynthetic characteristics and yield of peanut under film-mulched drip irrigation[J]. Journal of Peanut Science, 2020, 49(3): 32-39.
- [18] 严君, 韩晓增, 王树起, 等. 不同施氮量下一次与分次施氮对大豆土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 150-154.
YAN Jun, HAN Xiaozeng, WANG Shuqi, et al. Effects of single and multiple N application under different total N fertilizer on the amount of microorganisms and activity of enzymes of soybean[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 150-154.
- [19] 边大红, 刘梦星, 牛海峰, 等. 施氮时期对黄淮海平原夏玉米茎秆发育及倒伏的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2 294-2 304.
BIAN Dahong, LIU Mengxing, NIU Haifeng, et al. Effects of nitrogen application times on stem traits and lodging of summer maize (*zea mays* L.) in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(12): 2 294-2 304.
- [20] 付玉勇, 董元香, 陈志国. 不同追肥次数对玉米产量的影响试验研究[J]. 农业科技通讯, 2013(4): 69-71.
- [21] 白洁瑞, 邱淑芬, 李勇, 等. 氮肥分期施用对机插稻产量构成及氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(5): 45-49.
BAI Jierui, QIU Shufen, LI Yong, et al. Effects of N fertilizer application times on yield formation and N use efficiency of machine-transplanted rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(5): 45-49.
- [22] 李小利, 李昊儒, 郝卫平, 等. 滴灌施肥对华北小麦-玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 18-28.
LI Xiaoli, LI Haoru, HAO Weiping, et al. Impact of drip fertigation on yields and water use efficiency of wheat-maize rotation in North China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 18-28.
- [23] 董作珍, 董兰学, 王飞, 等. 不同施肥量和施肥次数对茴草产量及品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(5): 1 068-1 073.
DONG Zuozhen, DONG Lanxue, WANG Fei, et al. Effects of different fertilizer rates and application times on the yield and qualities of mat rush (*Juncus effusus* L.)[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(5): 1 068-1 073.
- [24] 丁宁, 姜远茂, 彭福田, 等. 分次追施氮肥对红富士苹果叶片衰老及¹⁵N吸收、利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 758-764.
DING Ning, JIANG Yuanmao, PENG Futian, et al. Studies on leaf senescence and ¹⁵N-urea absorption and utilization of 'Fuji' apple in response to topdressing nitrogen application[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 758-764.

Effects of Topdressing Frequency on Growth and Yield of Maize in Aeolian Sandy Soil under Fertigation

DOU Chaoyin, LIU Fuqiang

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: 【Objective】Fertilizer topdressing is an agricultural practice to provide crops with additional nutrients, but how topdressing frequency affects crop growth and yield is inadequately understood. The objective of this paper is to determine the optimal nitrogen topdressing frequency for improving maize cultivation in aeolian sandy soil.

【Method】The experiment was conducted in a maize field with nitrogen fertilizer applied in one (F1), two (F2), four (F3), seven (F4) and eleven (F5) topdressings. For each treatment, we measured the growth and grain yield of the maize. **【Result】** Topdressing once at the jointing stage or before the earing stage increased vegetative growth, stem

length and diameter, leaf area index, and *SPAD* content. In contrast, multiple topdressing improved spike length and diameter, kernel numbers per spike, and 100-seed weights, ultimately leading to an elevated yield. The grain yield depended not only on topdressing frequency but also on when and how the fertilizer was applied in each topdressing. For example, in the multiple topdressing, applying fertilizer during earing and tasseling stage reduced the kernel numbers, 100-seed weights, yield, and fertilizer use efficiency. Aligning fertilizer application with plant requirements in the multiple topdressing was critical to improving plant growth. Among all treatments, topdressing 11 times was optimal, with the yield reaching 7.36 t/hm², irrigation water use efficiency, water use efficiency, nitrogen use efficiency reaching 3.27 kg/m³, 1.25 kg/m³ and 24.52 kg/kg, respectively. **【Conclusion】** Increasing the frequency of fertilizer topdressing proves to be a highly effective strategy for improving maize growth and yield in aeolian sandy soil, presenting a promising approach for optimizing fertilization in this region.

Key words: nitrogen fertilizer; drip irrigation; aeolian sandy soil; fertigation; water use efficiency

责任编辑：白芳芳

(上接第 39 页)

The Effects of Irrigation Amount and Method on Soil CO₂ Emission and Yield of Summer Maize

YANG Le^{1,2}, CAO Hui^{1,2}, FU Yuanyuan¹, GAO Yang^{1*}, LIU Zhandong¹

(1. Institute of Filed Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100082, China)

Abstract: **【Objective】** Maize is an important staple crop in central and northern China, and during certain seasons, its cultivation needs irrigation. This paper studied the intertwined effect of irrigation amount and method on soil CO₂ emissions and the yield of summer maize. **【Method】** The field experiment compared two irrigation methods: conventional drip irrigation (DI) and alternating drip irrigation (ADI). For each irrigation, there were two irrigation amounts: 36 and 27 mm. In each treatment, we measured CO₂ emission using the Li-8100A. We also measured soil enzymatic activity, soil water content and temperature, and grain yield, from which we analyzed the dependence of soil CO₂ emission on soil water-filled porosity (*WFPS*) and soil temperature. **【Result】** Compared to DI, ADI reduced cumulative soil CO₂ emission by 12% to 17%. Increasing irrigation amount from 27 mm to 36 mm increased cumulative soil CO₂ emissions, despite the increase depending on irrigation method. A notable correlation was found between soil CO₂ emission and *WFPS* and soil temperature in the 0~10 cm soil layer. The impact of soil water and temperature on CO₂ emission was intertwined. Irrigation amount and method both affected soil enzyme activity via their effect on *WFPS* and soil temperature, which serve as a regulatory mechanism impacting soil CO₂ emissions. Irrigation amount and method also significantly affected maize yield. Compared with DI with irrigation amount of 36 mm, ADI with irrigation amount of 27 mm reduced the yield by 8.7%, but it reduced the cumulative CO₂ emission by 19%. **【Conclusion】** ADI with 27 mm of irrigation was most effective to ensure maize yield while reducing soil CO₂ emissions. It is a water-saving and emission-reducing irrigation method and can be used as an improved agronomic practice for maize production in the studied region.

Key words: maize; alternate drip irrigation; CO₂ emissions; soil enzymatic activity; yield

责任编辑：赵宇龙